

NOCIONES BASICAS Y GLOSARIO DE BALANCE METALURGICO

Actualizado Octubre 2007

Gabriel Redard B.
Ingeniero Civil Químico
www.copper-cobre.cl

Introducción.

Las empresas mineras que poseen procesos productivos continuos, por lo general presentan dificultades en establecer para un período discreto de tiempo, el balance de materiales que de satisfacción y sea equitativo para todos sus componentes y todas las áreas de proceso, debido a que se producen diferencias cuantitativas en flujos e inventarios, cuyo origen radica en los errores de medición.

En el caso específico de la minería de cobre, el actual estado de desarrollo y aplicación de sistemas de balance de materiales es de bajo nivel. La mayoría de las empresas no cuenta con un algoritmo matemático de optimización ni sistemas de ajuste computacional y se limita a efectuar balances, considerando el producto final como el valor pivote de referencia, efectuándose los ajustes hacia atrás sin un criterio establecido y fundamentado en procedimientos claros y lo que se detecta como faltante, es asignado arbitrariamente a la ley de mineral, para disgusto de mineros y geólogos, o como perdidas de proceso, para disgusto de los operadores, quedando la alternativa, que se reparta a ambos en forma arbitraria, situación en la que entre ellos se disputan punto a punto la eficiencia, los tonelajes y las leyes.

Esta falta de equidad en el balance, se transforma por lo general en una permanente discusión entre diferentes áreas de la cadena productiva, las que al tener sus propias metas de producción, luchan por su cumplimiento, en algunos casos con argumentos inverosímiles., poco creíbles y que en algunos casos escapan al sentido físico de los procesos.

En muchos casos, las discusiones o diferencias entre áreas, son zanjadas en forma arbitraria por un superior a las partes en disputa. En algunos casos, toda la organización queda involucrada en la incertidumbre de los parámetros de eficiencia y lo que es más grave, los inventarios físicos valorizados no corresponden a la realidad con la incertidumbre financiera que ello significa, ni poder comprometer producciones o comprometerlas en exceso.

Adicionalmente se tiene como consecuencia, la generación de errores de inversión en cadena, ya que los proyectos de expansión pueden no alcanzar los rendimientos proyectados, lo que hace que los retornos de los proyectos no sean los esperados.

La experiencia nos indica que frente a la existencia de un problema de balance, es decir, que se presenten diferencias no explicadas al establecer la ecuación de balance para cada nodo productivo o de proceso, es que en todos los casos se cumple la ley de Pareto: Aquello de lo mucho trivial y lo poco vital y se puede aventurar que el 80 % de los problemas de

COPPER-COBRE

balance, tienen su origen en las personas y sus decisiones y el 20 % en los procedimientos de medición y el algoritmo de cálculo.

De no existir los problemas de decisiones y los errores de medición, no sería necesario un balance computacional y bastaría con un balance contable igual que en un banco que maneja unidades discretas.

En términos generales, se puede dividir la minería del cobre en dos tipos de procesos básicos de beneficio: Sulfuros y Óxidos

Los sulfuros se procesan por flotación – fusión - electro refinación y los óxidos por Lixiviación-EW- SX, Sin embargo ya se han establecido algunas plantas que procesan por lixiviación, sulfuros secundarios en ciclos de lixiviación que pueden llegar hasta 300 o más días

Los procesos que corresponden a plantas muy antiguas, carentes de toda la instrumentación de medición y muestreo requerida son las que presentan las mayores deficiencias en los balances de materiales

Por otra parte, en muchas plantas se presenta el problema de balance de subproductos y de las emisiones fugitivas contaminantes, gaseosas, sólidas o líquidas

Muchas empresas vendedoras de software de balance y algunos investigadores y expertos hablan de la Reconciliación de datos. En esto hay que separar el concepto de consolidación de la información, de aquel efecto de corrección de datos que contienen errores groseros y que tienen que ser filtrados para no alterar significativamente los resultados del balance. De acuerdo a esta separación, en este documento se considera el concepto de **reconciliación**, como aquel proceso mediante el cual las diferencias no explicadas de balance son ajustadas mediante un algoritmo de cálculo, separando esto del efecto de **validación y corrección** de los datos anómalos, o que poseen errores groseros. Este último debe ser necesariamente previo a la reconciliación.

Para entender que la simpleza aparente de un balance de materiales, se deben conocer a fondo algunos conceptos como siguen:

Algoritmo

Se define como una secuencia ordenada y finita de procedimientos operaciones que permiten una solución a un problema determinado

Balance Diferencial:

$Entradas + Generación = Salidas + Consumo$

Es decir no hay variación de inventarios. Para un balance diferencial de masas los flujos están expresados en masa / tiempo (Caudales)

COPPER-COBRE

Balance General de Materiales:

En el que se debe cumplir la ecuación de conservación de la materia en términos de:

Entradas- Pérdidas- Productos + Inventarios iniciales- Inventarios finales = e

$$\Sigma \text{ ENTRADAS} + \Sigma \text{ INVENTARIOS INICIALES} - \Sigma \text{ SALIDAS} - \Sigma \text{ INVENTARIOS FINALES} = e \quad (1)$$

Lo que también se puede escribir como:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Generación} - \text{Consumo} = \text{Acumulación}$$

Ver definiciones en nodo de balance

Balance integral:

En el que se cumple la misma igualdad pero para un período de tiempo

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Variación de Inventario} = 0 \text{ o bien}$$

$$\text{Entradas} + \text{Inventario Inicial} - \text{Salidas} - \text{Inventario Final} = 0$$

Para un Balance Integral de masas los flujos están expresados en unidades absolutas no relativas al tiempo

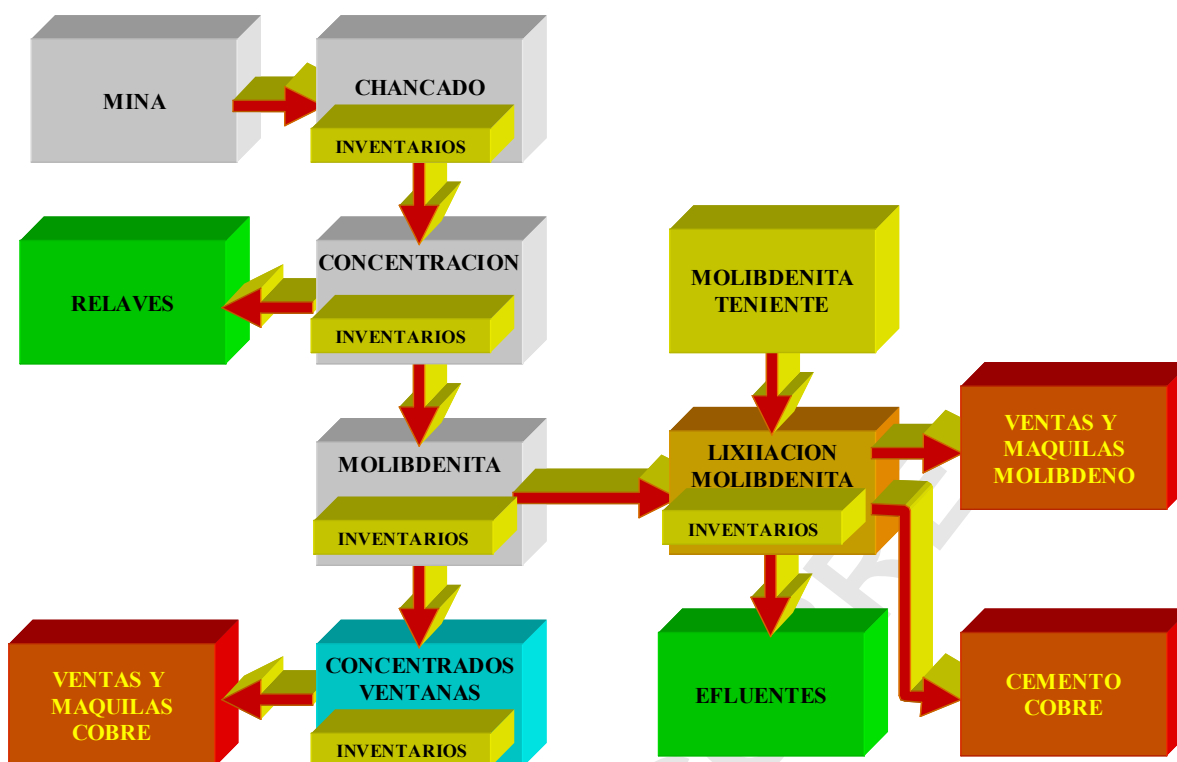
Calibración

Es la comparación de un instrumento o sistema de medición de exactitud no verificada, con un instrumento o sistema de exactitud conocida, verificada o certificada, para detectar cualquier desviación del comportamiento requerido.

Configuración de Balance:

En un proceso pueden existir muchos subprocesos que pueden ser perfectamente separados ya sea por la naturaleza química o física de las transformaciones que en ellos ocurren. Cuando esto ocurre, entonces pueden existir una serie de flujos circulantes entre diferentes procesos, inventarios en juego y es conveniente definir los nodos que representen estos subprocesos perfectamente identificables. En otras palabras, la configuración para un balance de materiales esta dada por el diagrama de flujos y existencias en inventarios del proceso total, disgregándolo en unidades perfectamente definibles En el siguiente diagrama se ilustra un proceso imaginario, con los diferentes intercambios y cada nodo con sus propios inventarios:

COPPER-COBRE



Se puede apreciar que existen nodos más complejos que otros pero todos deben dar satisfacción a la ley de conservación de la materia.

Contabilidad de materiales

En términos convencionales, la contabilidad de materiales no es más que una gestión contable de los materiales o componentes en proceso y que es de interés de las áreas de finanzas, sin embargo, las cifras consolidadas de esta gestión, son utilizadas por las áreas de procesos y por finanzas para determinar una serie de índices y parámetros de gestión y costo.

En la cadena de procesos desde la mina hasta obtener el producto final, se producen errores de medición que parten con las cantidades despachadas desde la mina, las que no son absolutas ni exentas de error y adicionalmente, se producen pérdidas de procesos, que tienen su origen en la incapacidad tecnológica para obtener una mejor recuperación de los minerales, debido a emisiones parásitas o también, pérdidas que son producidas por ineficiencia del proceso debido a falta de optimización y en este caso, es necesario conocer con precisión, en que puntos del proceso se producen las ineficiencias, con el propósito de tomar las acciones correctivas de mejoramiento.

COPPER-COBRE

Lo anterior, no es posible de controlar mediante una contabilidad metalúrgica en períodos discretos y menos en forma continua. Para ello se debe separar el concepto de contabilidad para un período discreto de tiempo, por ejemplo un mes, del concepto de comportamiento operacional, de los procesos y la metalurgia, que es una necesidad requerida en períodos mucho mas cortos ya sea de horas o minutos. Para el último concepto, los sistemas de medición y el control automático experto proporcionan información que permite controlar el proceso, pero tampoco entrega una información contable minuto a minuto.

La otra gran dificultad para efectuar balances de materiales de períodos muy cortos, es que no es posible disponer de la cuantificación certera de los inventarios en proceso minuto a minuto y la ejecución de un balance estará sujeta a la estimación de la veracidad de las mediciones de flujos e inventarios, como también de la relación existente entre los flujos de entrada y salida y la magnitud de los inventarios

Dato:

Un punto de dato es una medición. Para que la medición sea útil se requiere asociar la medición a su calidad o precisión y exactitud. Cualquier dato que no sea reproducible por medición debe ser considerado con reservas.

Ecuaciones de balance de materiales

Si se parte de la ecuación de conservación de la materia, se debe cumplir para las masas de los materiales o de sus componentes de cada nodo que:

$$\Sigma \text{ ENTRADAS} + \Sigma \text{ INVENTARIOS INICIALES} - \Sigma \text{ SALIDAS} - \Sigma \text{ INVENTARIOS FINALES} = \epsilon$$

En un balance perfecto sin pérdidas fugitivas y con mediciones sin error el término ϵ debe ser nulo

El término ϵ representa la diferencia no explicada generada por los errores de medición de flujos e inventarios y que se puede denominar como “delta balance” Este término debe ser nulo si no existen errores o si se ajusta un modelo para repartir de acuerdo a criterios matemáticos la diferencia encontrada.

COPPER-COBRE

Errores de medición en el balance

Todo tipo de medición física o química que se efectúe, está invariablemente afectada por algún tipo de error. No existe el error nulo.

Los errores de medición se traducen en la existencia de una diferencia entre el valor observado y el valor real.

De acuerdo a esto no es posible determinar cual es el valor real y a lo menos se podría tener una buena aproximación de dicho valor.

En los procesos que comprenden desde el muestreo de un mineral hasta el análisis químico, se cometen diferentes tipos de errores los que finalmente se traducen en la diferencia indicada.

En términos estadísticos se reconocen dos tipos de errores:

Errores de precisión, que corresponden a variaciones aleatorias de la respuesta del instrumento, dispositivo o proceso de medición

Este tipo de error tiene su origen en variaciones ya sea por las características electrónicas o mecánicas de instrumentos o procedimientos y manipulación y que oscilan en torno al valor real de la medición, o por errores introducidos en forma aleatoria en los procesos de medición como son el muestreo, preparación y análisis químico

En general los errores de precisión, por su aleatoriedad, generalmente están distribuidos en forma normal y en tal caso su media es cero y su variabilidad está expresada por la desviación estándar.

No obstante Este error tiene importancia cuando la medición es única, por ejemplo; medición del volumen de un inventario. Si se midiera varias veces, el promedio de las mediciones tendrá una mejor aproximación al valor real

Errores de exactitud, (Sesgo, Bías, Desvío, Descalibración) que corresponde a una diferencia sistemática entre los valores indicados por el instrumento y los valores reales promedios referenciados a un estándar o valor de referencia.

El origen de estos errores está en las descalibraciones (deriva) de los instrumentos de medición o en a introducción de errores de tipo sistemático de origen en factores externos.

A diferencia de lo anterior, los errores de descalibración, pueden ser de tipo sistemático y las descalibraciones pueden tener una distribución que no puede ser asimilada a un fenómeno de distribución de frecuencias conocido, debido a la gran cantidad de factores que originan el desvío los que podrían ser repetitivos o no.

COPPER-COBRE

En los procesos industriales, el error de sesgo no es siempre constante sino que es afectado por factores externos físicos, mecánicos o de otra naturaleza, por lo cual también presenta una variabilidad en torno a un valor promedio y con una distribución desconocida.

Espacio de solución

Aunque hay un número infinito de puntos factibles en el espacio de soluciones para un modelo de optimización, la solución óptima puede determinarse al observar la dirección en la cual aumenta la función objetivo.

Información:

En contraste con un dato, una información provee la base para la toma de decisiones. Una información puede ser simplemente numérica, pero ella puede ser una conclusión del análisis de muchos datos. Otra definición de información es que consiste en datos refinados, concentrados y procesados.

La incertidumbre de una medición

Es la duda que existe respecto del resultado de dicha medición. Sin embargo en toda medición, aún en las más cuidadosas, existe siempre un margen de duda.

No es posible conocer el valor real, pero si se mide repetidas veces se puede obtener un promedio de las mediciones. Si las mediciones están distribuidas normalmente, entonces se puede estimar para una probabilidad dada, el rango en el cual se encuentra el valor real.

La incertidumbre del balance

Hemos visto que la diferencia no explicada en la ecuación de balance representa en sí misma la incerteza de las mediciones en el nodo, sin embargo si mediante un proceso matemático, dicha diferencia es repartida de acuerdo a criterios estadísticos pre establecidos, entre los flujos de entrada y salida y los inventarios para que la diferencia se haga nula, esto no dignifica que el balance resultante no presente un grado de incertidumbre respecto de los valores reales de cada flujo. Dependiendo del modelo pueden haber miles de soluciones que ajustan la diferencia no explicada y por lo tanto miles de incertidumbres de balance.

En otras palabras, tampoco es posible conocer el valor real de un balance y siempre existirá una incertidumbre respecto de su resultado. Esta incertidumbre puede ser estimada por las varianzas de medición y por propagación.

COPPER-COBRE

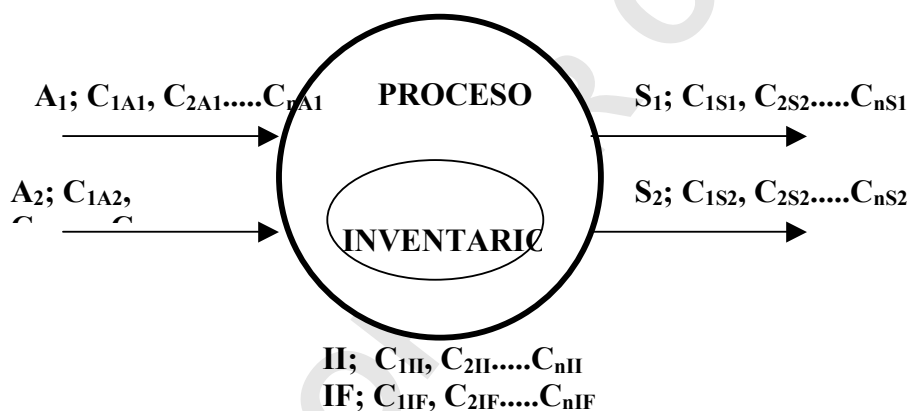
Modelo Matemático de Optimización

Los matemático es utilizado en ingeniería para resolver problemas que son indeterminados en su definición y presentan mas de una solución factible.

Por lo general se establece un modelo matemático mediante una función objetivo y restricciones que fijan los límites de factibilidad de soluciones posibles, espacio en el cual se encuentra la solución óptima por minimización o maximización.

Nodo de balance:

Un nodo de balance puede ser un proceso, un grupo de procesos o subprocesos perfectamente identificables de una operación metalurgica en cuanto a sus flujos de entrada, salida e inventarios al que se le puede aplicar la ley de conservación de la materia y puede ser representado por una caja como sigue:



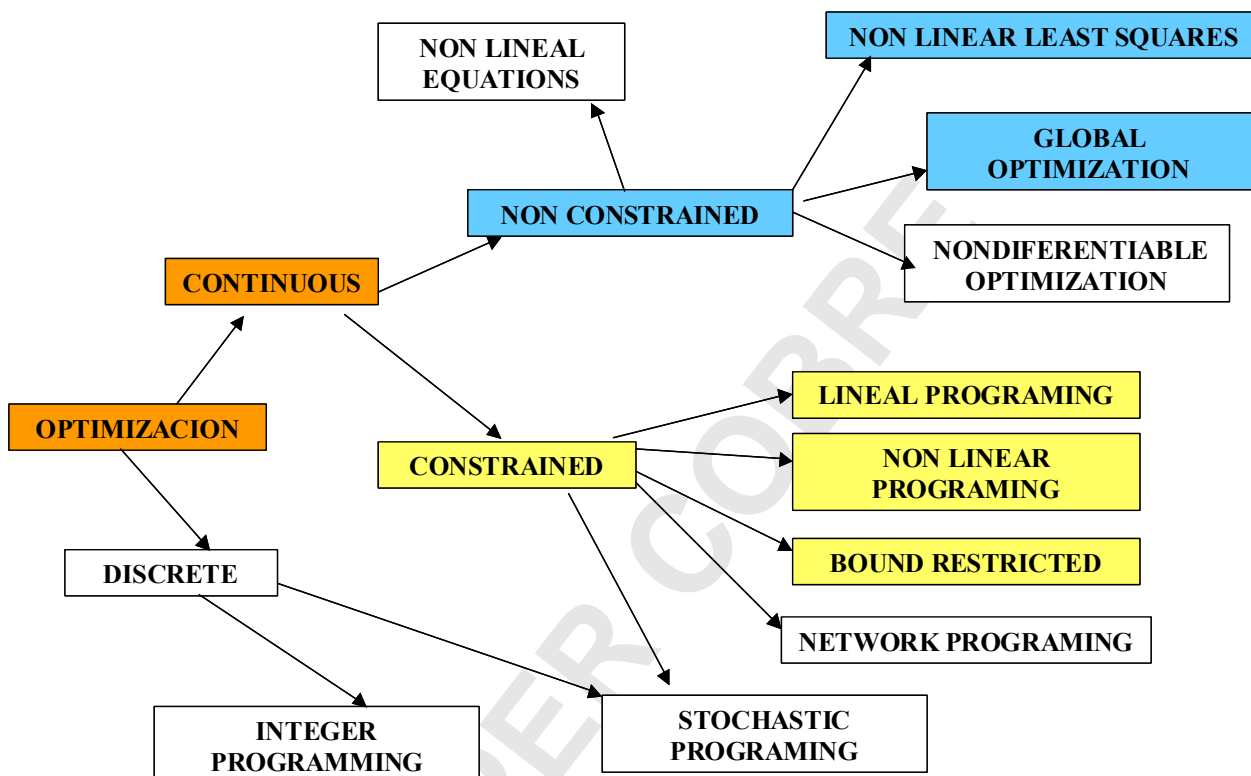
El proceso esquematizado arriba tiene como toneladas de alimentación A1 y A2, como salidas o productos los toneladas S1 y S2 como inventarios tiene los II e IF que representan los toneladas iniciales y finales de un período de operación.

Adicionalmente cada flujo tiene los componentes C1, C2, ...Cn y lo mismo para los inventarios

COPPER-COBRE

Optimización

Existen diversos caminos de optimización según sea la naturaleza del problema y el siguiente cuadro resume las diferentes alternativas



Outliers,

Son mediciones que no están dentro de los límites de una distribución normal que sigue la mayoría de los datos.

Las mediciones erróneas se clasifican como outliers o como errores groseros

Los outliers o errores groseros a menudo aparecen como valores anómalos, pero no todos los outliers son errores groseros. Algunos outliers son valores reales y pueden constituir los valores más importantes de la muestra. Los outliers mismos, son mediciones que no están dentro de los límites de una distribución normal que sigue la mayoría de los datos.

COPPER-COBRE

RECONCILIACIÓN DE DATOS

Es un proceso de validación de la información recopilada y su objetivo hacer consecuente las mediciones con los resultados de un balance.

La principal suposición en la reconciliación de datos industriales, es que las mediciones y datos obtenidos, corresponden a un proceso en estado estacionario y los operadores consideran por cada instrumento de medición, los valores instantáneos, promedios o totales por turno o diarios. Sin embargo, las plantas de proceso metalúrgico, a diferencia de otros procesos químicos, nunca están en estado estacionario, sino que están sujetas a variaciones propias de los materiales que se procesan y del comportamiento de los equipos de proceso y de factores externos o co-factores que afectan el resultado de alguna o mas variables.

A pesar de la validez discutible de la suposición del estado estacionario, los paquetes computacionales de reconciliación de datos, han sido relativamente exitosos en proceso relativamente estables, pero discutibles en sus resultados en procesos con variabilidades altas.

Otra importante limitación de la tecnología para detectar outliers, es la relacionada con la descalibración temporal o tendencia de descalibración de instrumentos de medición, la que si es paulatina y sistemática en un solo sentido, se puede interpretar como una variación de procesos y no ser considerada ni como outlier o como un sesgo que debe ser corregido. De esta forma, los valores promedios estarán afectados por el sesgo y en la reconciliación se obtendrá flujos con valores no reales para un balance de materiales

Está claro que un simple outlier, si no es un valor real y está localizado lo suficientemente lejos del promedio, puede arruinar por completo un análisis por mínimos cuadrados, por otra parte si son eliminados o reemplazados por un valor promedio, se introducirá igualmente una distorsión. La reacción común a este peligro puede ser objetiva o subjetiva y llevar a rechazar los valores que constituyen outliers, o a aprobar aquellos que parecen normales y que su valor real está lejos del valor medido.

En nuestra opinión, los únicos errores groseros corregibles son aquellos que se producen por la ausencia de información o falla total de los sistemas de medición y en tal caso es procedente una corrección basada en un procedimiento establecido.

Eliminando los datos groseros observables, quedan dos alternativas de tratamiento de los outliers para su manejo en un balance de materiales: Efectuar una corrección mediante una técnica estadística en la captura de los datos, con lo cual se puede alterar los valores reales, o bien, no hacer ninguna corrección y hacer que el sistema de optimización corrija los valores de los flujos de balance mediante un algoritmo válido.

La optimización de datos es generalmente realizada para minimizar una función objetivo de cuadrados, sujeto a las ecuaciones del modelo, que contiene

COPPER-COBRE

restricciones que incluyen probabilidades y que asumen distribución normal para los errores. Las ecuaciones del algoritmo van desde simples balances de masa, componente y energía hasta modelos complejos que involucran todas las variables y parámetros del sistema, a modelos completos involucrando todo el sistema, las variables y parámetros.

También es posible considerar balances de materiales de un componente, por ejemplo masas, o un balance multi componentes en el que se incluye: masa, leyes, finos, elementos que son subproductos, elementos contaminantes y otros.

Relación Masa de flujos a masa de componentes.

En un sistema multi componentes, es de alta importancia, que no tan solo el balance de masas de los flujos, cumpla con la ecuación de conservación de la materia, sino que también las masas correspondientes a todos sus componentes.

Esto es fundamental si la masa de los componentes constituyen los valores a extraer de la masa de los flujos y por lo tanto, los balances de masa de los flujos y los de sus componentes no pueden ser independientes entre sí, debido a que la ley de conservaciones debe cumplirse para todos

Residuo

Si tenemos un conjunto de mediciones sucede que el mas probable valor de la medición real corresponde al promedio de dichas mediciones, Si se compara cada medición individual con el promedio la diferencia entre ellas, se llama residuo

Sistema

Cualquier porción del universo definida por límites específicos. Para la resolución de un problema podemos considerar el universo dividido en dos: nuestro sistema y el resto

Tipos de balance

Los balances de materiales en cualquier tipo de procesos, cumplen con varios objetivos :

Balance másico: Que tiene interés en operaciones para verificar los cumplimientos de tratamiento, pérdidas de materiales y variaciones de inventarios. También es importante en el cálculo de parámetros operacionales y de manutención.

Balance Metalúrgico: Que tiene interés a través del balance másico y de los componentes , para el cálculo de eficiencias, rendimientos y en la búsqueda explicaciones metalúrgicas frente a alteraciones detectadas..

Balance contable; Cuyo interés está enfocado a las finanzas y análisis de gestión económica y financiera de la empresa o sus unidades.

COPPER-COBRE

Balance ambiental; Cuya importancia es cuantificar y evaluar el impacto de las emisiones o pérdidas fugitivas que afectan al medioambiente

Es obvio que no pueden existir diferentes bases de datos de resultados para los balances mencionados y por lo tanto, se debe efectuar un balance consolidado que permita que todos los balances anteriores tengan la misma base de cálculo.

Tipos de procesos

Batch: Los materiales o reactivos se colocan en un reactor al inicio y solamente se retiran los productos al final del proceso. No hay intercambio de materiales con el medio externo al proceso durante el tiempo de reacción

Proceso continuo: Los materiales fluyen entrando y saliendo en un reactor, en el que ocurre un proceso en forma continua

Proceso semibatch: Es un proceso que no puede ser clasificado en ninguna de las categorías anteriores y que puede tener características intermitentes de uno u otro. Los procesos continuos pueden operar de dos formas:

Estado estacionario: En el que las variables no cambian su magnitud en el tiempo, si se ignoran las variaciones aleatorias propias de las mediciones, es decir permanecen estabilizadas con pequeñas variaciones

Estado no estacionario o transiente: En el que las variables fluctúan en el tiempo ya sea en forma oscilatoria o en tendencias de cambio con el tiempo de un nivel de magnitud u otro diferente

Trazabilidad

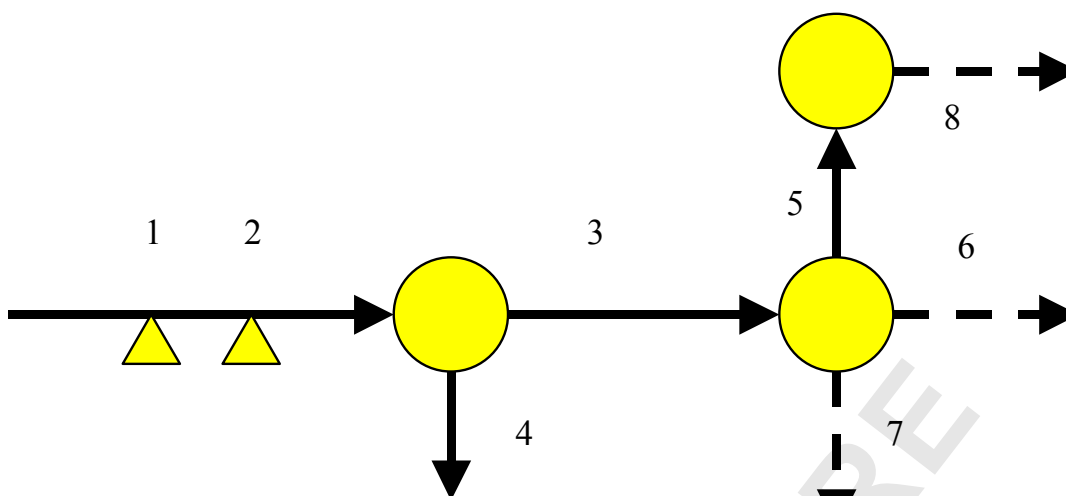
Aptitud de reconstruir la historia, la utilización o la localización de un producto por medio de identificaciones registradas.

Validación

Confirmación por examen y aporte de evidencias objetivas de que los requisitos particulares para un uso específico previsto han sido satisfechos.

COPPER-COBRE

VARIABLES clasificadas de acuerdo al tipo y propiedades



Variable redundante Una variable es redundante si siendo medida, también puede ser calculada utilizando otras variables.

Variable observable Una variable no medida, es observable si puede ser únicamente calculada desde otras variables medidas

1,2,3,4 Variables medidas redundantes

5 Medida no redundante

6, 7 No medidas no observables

8 No medida observable

CLASIFICACION DE VARIABLES

CLASIFICACION DE TIPO VARIABLES	PROPIEDADES
MEDIDAS	REDUNDANTE RECONCILIABLE
	NO REDUNDANTE PERMANECE INTACTA EN LA RECONCILIACION
NO MEDIDAS	OBSERVABLE PUEDE SER CALCULADA
	NO OBSERVABLE NO PUEDE SER CALCULADA
CONSTANTES	NO CAMBIAN NO REQUIERE SER CALCULADA

COPPER-COBRE

Verificación

Confirmación por examen y aporte de evidencias objetivas que los valores de datos o requisitos especificados han sido satisfechos.

COPPER COBRE